

## ESTUDO DO SISTEMA VERTICAL DE REFERÊNCIA DO EQUADOR NO CONTEXTO DA UNIFICAÇÃO DO DATUM VERTICAL

### *Study of the Ecuadorian Vertical Reference System in the Vertical Datum Unification Context*

José L. Carrión Sánchez<sup>1</sup>

Sílvio R. Correia de Freitas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Paraná - UFPR. Setor de Ciências da Terra – Departamento de Geomática  
Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba, Paraná, Brasil  
[josecarrions@hotmail.com](mailto:josecarrions@hotmail.com); [sfreitas@ufpr.br](mailto:sfreitas@ufpr.br)

#### **Resumo:**

O Equador e em geral os demais países da América do Sul, não dispõem de uma referência única para as altitudes. Cada país tem o *Datum* Vertical (DV) associado a uma superfície de nível obtida dos registros de um ou vários marégrafos. A relação entre os diferentes *data* verticais locais é condicionada, idealmente, pelas variações espaço-temporais da superfície do oceano. O conhecimento das discrepâncias entre *data* verticais é um elemento fundamental na realização de um Sistema Vertical de Referência (SVR) com características globais (SVRG) que permita a determinação de altitudes físicas e contribua ao monitoramento de parâmetros físicos do Sistema Terra. O presente estudo do SVR equatoriano (SVRE) é apresentado em termos de tipo de altitude, consistência com Modelos Globais de Geopotencial (MGGs) e a sua relação com um SVRG. Também, explorou-se a técnica da modelagem residual do terreno com propósito de complementar a informação espectral da alta frequência nos MGGs, os Modelos Digitais de Elevação (MDE) empregados foram o *Global Multi-Resolution Topography* (GMRT) e o *ETOPO1 – Global Relief Model*. Como uma solução alternativa, uma abordagem oceanográfica baseada no modelo *MSS CLS011* e o modelo *GOCONS-TIM-R5* foi utilizada para estimativa da *Sea Surface Topography* (SSTop) no marégrafo fundamental do Equador.

**Palavras-chave:** Sistema Vertical de Referência do Equador, Modelos Digitais de Altitude, Topografia do Nível Médio do Mar, Modelos Globais de Geopotencial.

#### **Abstract:**

Ecuador, like all the South American countries, currently does not have a single Vertical Reference System (VRS). Each country has the Vertical Datum (VD) associated with a level surface obtained from one or more tide gauges records. Moreover, these references were defined in different epochs. The relationship between the different Local Vertical Frames (LVFs) is conditioned, ideally, for the temporal variations of the ocean surface. The LVFs offset is a key element to achieving a Global VRS (GVRS), which allows the determination of physical heights and contribute to the monitoring of physical parameters of the Earth System. In this article, we

present a study of the Ecuadorian VRS (EVRS) in terms of height type, consistency with Global Geopotencial Models (GGMs) and its relationship with a GVRs. In addition, the Residual Terrain Modeling (RTM) technique was explored to complement the high-frequency spectral information in GGMs; the used Digital Elevation Models (DEM) were the Global Multi-Resolution Topography (GMRT) and the *ETOPO1* - Global Relief Model. An alternative approach based on the oceanographic model *MSS CLS011* and the model *GOCONS-TIM-R5* was used for the estimation of the Sea Surface Topography (SSTop) in the fundamental tide gauge in Ecuador.

**Keywords:** Ecuadorian Vertical Reference System, Sea Surface Topography, Digital Height Models, Global Geopotencial Models.

## 1. Introdução

No âmbito das Ciências da Terra, a definição e realização de um Sistema Vertical de Referência (SVR) para as altitudes tem sido sempre uma temática de grande interesse, desde aplicações locais da engenharia até aplicações globais como o monitoramento dos processos dinâmicos envolvidos no Sistema Terra (Plag, et al., 2009). Com o objetivo de conseguir a definição de um SVR tem-se desenvolvido técnicas e metodologias para estabelecer uma superfície de referência para as altitudes em nível local e sua relação com uma global. Na atualidade, um dos objetivos fundamentais da Geodésia é o estabelecimento de um Sistema Vertical de Referência Global (SVRG), razão pela qual grande quantidade de países estão trabalhando na vinculação dos SVR locais (SVRL) com um SVRG. Dois projetos continentais importantes têm entre seus objetivos alcançar a vinculação entre SVRLs, estes são: EUREF (*European Reference Frame*) no caso da Europa e SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, Sub-Comissão-1.3b da IAG) para as Américas e o Caribe. SIRGAS, com seu Grupo de Trabalho III (SIRGAS-GT-III) busca aplicar uma estratégia para o estabelecimento de um sistema único com base na integração dos Sistemas de Referência Verticais Nacionais (SVRN) ao SVRG. A solução prevista é estruturada com base na padronização das bases de dados das redes verticais nacionais convencionais e incorporação de dados globais oriundos de plataformas orbitais tais como gravimetria por satélite, altimetria por radar a bordo de satélites e GNSS.

Vários países na América Latina têm tomado iniciativas para a conexão das redes verticais com um SVRG (Ferreira & De Freitas, 2012). No caso do Brasil, algumas abordagens de conexão de redes verticais por estratégias terrestres e por satélite têm sido aplicadas. Por exemplo, já houve uma tentativa de conexão dos segmentos de Imbituba e Santana com base em dados GNSS/Nivelamento (GNSS/NIV) e Modelos Globais de Geopotencial (MGGs) (Montecino & De Freitas, 2011). Outro exemplo é a conexão do SVR do Brasil (SVRB) e do SVR argentino (SVRA) realizado com base em nivelamento geométrico e integração com um MGG (Gomez, et al., 2015). Por outro lado, o trabalho de Montecino, et. al (2014), apresentam um estudo do SVR chileno com base em MGGs, GNSS/NIV e modelos oceanográficos com propósito da conexão a uma superfície de referência global (SRG) materializada pelos MGGs. No marco do projeto SIRGAS 2000, as redes de controle vertical da Venezuela, Brasil e Colômbia foram conectadas por nivelamento e determinação de altitudes elipsóidicas, combinando estas medições com um modelo de geoide global (Hernández, et al., 2001).

Já no caso do Equador, como na maioria dos países da América do Sul, a componente vertical tem sido menos explorada do que a componente horizontal. Escassos estudos relacionados com os aspectos de definição e realização do Sistema Vertical de Referência do Equador (SVRE) têm sido reportados. Entre os relatórios divulgados tem-se o trabalho “*Determinación del Datum Vertical de La Libertad, Ecuador*” (Paredes, 1986), no qual apresentam-se os antecedentes e o contexto em que surgiu a necessidade de se estabelecer um marégrafo no território continental equatoriano para referir as altitudes; além disso é apresentada uma breve análise dos dados maregráficos e o período do registro maregráfico usado para a definição do nível médio do mar (NMM) envolvendo 36 anos de observações (1948-1984). Outro trabalho relacionado com o Datum Vertical do Equador (DVE) é o realizado por Alavera e Nath (2013), que mostra a metodologia usada na determinação do NMM para a definição do zero do sensor ao longo do tempo.

Estudos orientados à determinação de uma superfície de referência para as altitudes físicas no SVRE têm sido desenvolvidos como projetos de pesquisa. Entre estes trabalhos encontram-se o cálculo e interpolação de anomalias da gravidade (Tierra & De Freitas, 2003), determinação de alturas geoidais residuais (Jijón & Tierra, 2008), obtenção de modelos geoidais mediante interpolação por Colocação por Mínimos Quadrados (CMQ) (Echeverría & Tierra, 2010), e por técnicas de inteligência artificial (Carrión, et al., 2013).

Em vista das poucas pesquisas reportadas no contexto de estudo do SVRE, torna-se importante explorar os aspectos envolvidos na sua definição e realização. Graças a que hoje tem-se importantes informações oriundas de plataformas orbitais que são de abrangência global e em geral de livre acesso, é possível estudar até uma determinada resolução os SVRs.

A informação global proveniente da altimetria por radar a bordo de satélites e os MGGs, constituem-se em elementos chave para a determinação da discrepância existente entre os Sistemas Verticais de Referência Locais SVRL e um SVRG. Os sistemas de altitudes clássicos têm que adaptar-se ao novo referencial global, o qual implica mudanças radicais na determinação de altitudes locais e regionais. No presente trabalho é realizada uma primeira aproximação ao cálculo da discrepância entre o DVE e um DV global (DVG).

A metodologia proposta envolve duas abordagens. A primeira está relacionada com o cálculo de alturas geoidais e anomalias de altitude nos pontos da Rede Vertical Fundamental do Equador (RVFE) que dispõem de altitudes geométricas (GNSS) (Método Geodésico) (Burša, et al., 2004), o cálculo é realizado com os MGGs *GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM\_R5* (ICGEM, 2014) e *EGM2008* (Pavlis, et al., 2008), melhorados mediante a técnica RTM usando os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) *GMRT* (*Global Multi-Resolution Topography*) e o *ETOPO1*. (Hirt, et al., 2010) A segunda abordagem está orientada ao cálculo da Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM) ou *Sea Surface Topography* (SSTop).

São úteis também os denominados Modelos da Superfície Média do Mar em relação ao elipsoide de referência (a expressão de maior utilização é *Mean Sea Surface* – MSS, em língua inglesa), obtidos das missões de altimetria por radar a bordo de satélites e que confrontados com valores de alturas geoidais obtidas de um MGG possibilitam a obtenção da TNMM (abordagem oceanográfica) (Ekman, 1999). A missão da altimetria por radar sobre os oceanos de maior sucesso até a atualidade é a *Topex/Poseidon* que foi continuada pelas missões *Jason 1* e *Jason 2*. A RVRE está vinculada ao marégrafo *La Libertad*, e usa altitudes niveladas. Para sua realização as altitudes foram obtidas desde o procedimento convencional de nivelamento geométrico e eventualmente de nivelamento trigonométrico, sem aplicar nenhum tipo de correção gravimétrica. Até hoje a RVRE não foi ajustada de forma simultânea (Comunicação pessoal – Instituto Geográfico Militar Equador).

Neste trabalho busca-se explorar a aderência dos MGGs de última geração em relação às altitudes do SVRE, além disso explorou-se o afastamento do SVRE em relação a uma superfície de referência global com base em MGGs (*GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM\_R5* e *EGM2008*) e o MSS -

*CNES-CLS-2011* (CNES, 2014). Também foi adicionada e avaliada a contribuição espectral do efeito RTM sobre os MGGs.

## 2. Dados e métodos

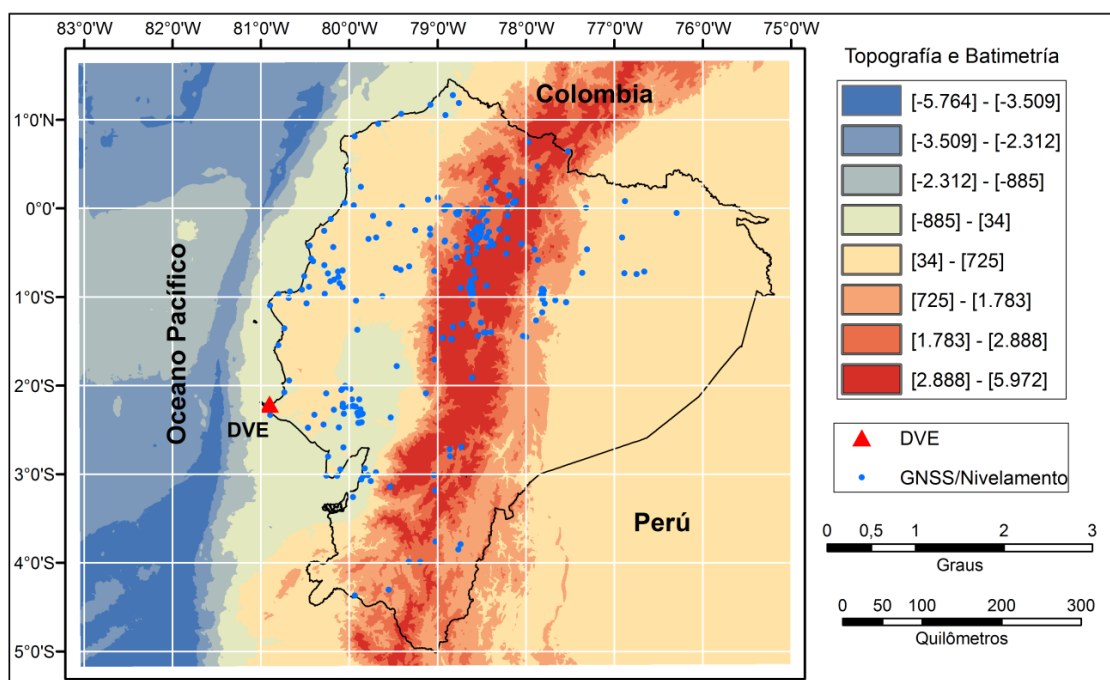
Uma descrição da região considerada no estudo, além do detalhe da informação empregada e da metodologia adotada neste trabalho, são apresentadas nas seções seguintes.

### 2.1 Região de estudo

A região de estudo está definida pelos pontos GNSS/NIV disponíveis da RVRE no Equador. Todas as linhas de nivelamento existentes estão referidas ao DVE, materializado com o marégrafo *La Libertad*. O DVE com coordenadas:  $\lambda$ :  $-80.9064^\circ$ ,  $\varphi$ :  $-2.2177^\circ$ , foi instalado no ano de 1948 e desde então tem registrado as variações do nível do mar de forma contínua.

Os pontos da RVRE usados neste estudo estão localizados na região compreendida entre as seguintes coordenadas:  $-4^\circ 22' < \varphi < 1^\circ 16'$  e  $-80^\circ 55' < \lambda < -76^\circ 17'$ .

Por outro lado, o Equador tem uma topografia irregular apresentando altitudes sobre o NMM que alcançam os 6313 m na região da Cordilheira dos Andes (Figura 1).



**Figura 1:** Topografia da região de estudo e GNSS/NIV

## 2.2 Dados

Para a aplicação da metodologia proposta, foi necessário dispor de: referências de nível da RVRE nas quais observou-se também altitudes elipsóidicas com GNSS (GNSS/NIV) na área de estudo, MGGs, MDEs e um modelo de MSS.

O sistema de marés permanentes (Ekman, 1989) dito Sistema Livre de Maré (*tide free* em Inglês) foi usado tanto para os dados oriundos de GNSS, como para os oriundos dos MGGs, MDEs e MSS. Os dados da RVRE foram convertidos do Sistema Médio de Marés (*mean tide* em Inglês) para o *tide free*. A descrição dos dados e modelos é apresentada na sequência.

### 2.2.1 Altitudes Niveladas e Elipsóidicas-GNSS

No Equador continental, a rede de nivelamento foi materializada tomando como referência o marégrafo *La Libertad*, o nivelamento apresenta uma tolerância de fechamento de  $4\text{ mm}\sqrt{k}$  e um erro padrão estimado de  $4\text{ mm}\sqrt{k}$ , onde  $k$  é a média da distância nivelada e contra-nivelada em quilômetros (IGM, 2005). A correção por efeito da gravidade ainda não foi realizada, e a rede também não foi ajustada. Portanto no Equador, por não ter sido considerado o não paralelismo das superfícies de nível, não estão disponíveis altitudes referidas a uma única superfície equipotencial do campo de gravidade real. A distribuição espacial dos pontos de nivelamento está determinada pela configuração da rede de estradas nacional. As altitudes niveladas por encontrar-se em um sistema de marés *mean tide* tiveram que ser transformadas a um sistema *tide free* para serem compatíveis com a informação proveniente dos modelos e de GNSS.

Além de altitudes niveladas, altitudes elipsóidicas obtidas com base em posicionamento GNSS nas mesmas referências de nível (GNSS/NIV) foram usadas. O Instituto Geográfico Militar do Equador (IGM) tem realizado algumas campanhas de rastreo GNSS sobre os pontos da rede de nivelamento. A precisão para o posicionamento por satélite dos pontos está na ordem de 10 cm. (Comunicação pessoal - IGM) (Figura 1).

Para o presente trabalho foram usados um total de 240 pontos dos quais são conhecidas as altitudes oriundas do nivelamento geométrico e as altitudes elipsóidicas. As coordenadas dos pontos estão referidas ao marco de referência SIRGAS (*ITRF94*), época de referência 1995.4. A distribuição espacial dos 240 pontos é heterogênea. Na atualidade o IGM tem reportado o levantamento de 670 km de nivelamento realizado no ano 2013, com espaçamento de 1.5 km entre as referências verticais e com registros GNSS cada 5 km (Pazmiño, 2013).

### 2.2.2 Modelos Globais do Geopotencial (MGGs)

Os MGGs usados foram:

**GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM\_R5** (Brockmann, et al., 2014): modelo somente satélite baseado em dados da missão *Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer* (GOCE),

expandido até o grau e ordem 280 e com resolução espacial de  $\lambda/2 \cong 70$  km, sendo  $\lambda$  o comprimento de onda associado ao grau de desenvolvimento.

**EGM2008** (Pavlis, et al., 2008): desenvolvido em série de funções harmônicas esféricas até o grau 2190 e ordem 2159 com resolução espacial de  $\lambda/2 \cong 9.2$  km, este modelo representa o estado da arte dos MGGs que combinam dados de diversas fontes (gravimetria convencional regional e por satélites, altimetria por radar a bordo de satélites e RTM). O EGM2008 tem sido continuamente testado pelo fato de envolver a integração de dados locais com globais em diferentes sistemas de referência.

Ambos os MGGs foram obtidos do *International Center for Global Gravity Field Models* (ICGEM), estão no sistema livre de maré e referidos ao elipsoide de referência WGS84. No cálculo das grandezas derivadas dos MGGs foi considerado o termo de grau zero para transformação dos valores provenientes dos MGGs referidos a um elipsoide médio terrestre ideal em grandezas referidas ao WGS84.

### 2.2.3 Modelos Digitais de Elevação (MDEs)

Para aplicar a técnica *Residual Terrain Model* (RTM) foram utilizados os MDEs:

**GMRTv2.0** (*Global Multi-Resolution Topography*): com uma resolução espacial continental de 30 m e oceânica de 100 m, incluindo informação oriunda dos modelos: *NASA Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), *Subglacial Topographic Model of the Antarctic* (SCAR) e *International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean* (Ryan, et al., 2009).

**ETOPO1**: com resolução espacial de 1 minuto de arco  $\sim 1.85$  km, integrando topografia e batimetria provenientes de variadas fontes de dados regionais e globais (Amante & Eakins, 2009).

### 2.2.4 Modelo de superfície média do mar MSS CNES – CLS011

Com o objetivo de explorar o efeito da TNMM no marégrafo *La Libertad*, o MSS CNES CLS011 (Schaeffer, et al., 2012) associado com o MGG *GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM\_R5* foram usados. O MSS CNES CLS011 é disponibilizado em uma grade com espaçamento de  $0,0333^\circ$  em latitude e longitude, os valores de MSS foram obtidos de observações correspondentes ao período 1993-2009, dos satélites *Topex/Poseidon*, *ERS-2*, *ERS-1*, *GFO*, *Envisat* e *Jason-1*. O modelo usa o *Topex/Poseidon* como elipsoide de referência e foi obtido do site:

<http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/auxiliary-products/mss.html>.

## 2.3 Métodos

### a. Método geodésico e oceanográfico

Diversos métodos têm sido explorados para a determinação do afastamento dos DVLs em relação a uma superfície de nível global. No presente trabalho duas abordagens são aplicadas. A abordagem geodésica é baseada na metodologia proposta por Burša, et al. (2004) que utiliza a determinação da discrepância média de uma superfície regional modelada a partir dos valores  $N_{GNSS/NIV}$  relativamente a uma superfície global modelada por um MGG. Neste caso a área mínima a ser considerada para o estudo de aderência é de  $\sim 330$  mil km<sup>2</sup>. Além de aplicar a abordagem geodésica baseada em dados GNSS/NIV, uma estratégia oceanográfica também foi explorada. Esta estratégia está baseada no conceito de TNMM, ou seja, a separação entre o NMM e o geoide, na abordagem considera-se que o afastamento entre o datum vertical local e global é representado pelo valor da TNMM no marégrafo (Bosch, 2001).

Para a aplicação das duas abordagens é necessário calcular a estimativa da altura geoidal  $N_{GNSS/NIV}$  (método geométrico) nos pontos de teste. As altitudes niveladas foram transformadas para um sistema de marés *tide free* para serem compatíveis com as altitudes elipsóidicas, a transformação foi realizada usando a equação dada por Ekman (1989). (Equação 1):

$$H_m - H_n = 29.6\gamma(\sin^2\varphi_N - \sin^2\varphi_S) \quad (1)$$

Onde  $H_m$  é uma altitude no sistema *mean tide*,  $H_n$  é uma altitude no sistema *tide free*;  $\varphi_N$  e  $\varphi_S$  são as latitudes extremas dos pontos da área de estudo, e  $\gamma \approx 0.68$  é uma constante.

O valor obtido da diferença entre altitudes geométricas ( $h$ ) oriundas da técnica de posicionamento por satélite e das altitudes niveladas ( $H_{NIV}$ ) (Equação 2), constitui a referência para a estimativa do afastamento em relação a uma superfície de nível global e servirá de base para realizar as análises das soluções propostas.  $N_{GNSS/NIV}$  é dado por:

$$N_{GNSS/NIV} \approx h_{GNSS} - H_{NIV} \quad (2)$$

A superfície de nível global é materializada por intermédio do cálculo de anomalias de altitude ( $\zeta$ ) e alturas geoidais ( $N$ ) provenientes dos MGGs (Equações 4 e 5) e considerando a contribuição do efeito da topografia residual (Efeito RTM) (Ferreira, et al., 2013). O cálculo das duas grandezas é realizado com o objetivo de testar se o DVE apresenta uma maior separação em relação ao quase geoide ou ao geoide. Para o cálculo são propostas quatro soluções:

**I.** Com base no *GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM\_R5* com seu máximo grau e ordem de desenvolvimento (280).

**II.** Com base no *EGM2008* com seu máximo grau e ordem de desenvolvimento (respectivamente 2190 e 2159).

**III.** Cálculo realizado pela composição de bandas espectrais do geopotencial, *GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM\_R5* para a baixa e média frequências e mediante a técnica RTM para a alta frequência.

**IV.** Cálculo realizado pela composição de bandas espectrais do geopotencial, *GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM\_R5* para a baixa frequência, *EGM2008* (desde o grau 280 até o grau 2190 de desenvolvimento) para a média frequência e RTM para a alta frequência (Equação 3).

$$\zeta = \zeta_{TIM\_R5} + \zeta_{EGM08(280-2190)} + \zeta_{RTM} \quad (3)$$

O cálculo da anomalia de altitude  $\zeta$  por intermédio dos MGGs é realizado com a seguinte equação (Hofmann & Moritz, 2005):

$$\zeta = \frac{GM}{r\gamma} \left[ \sum_{n=2}^{n_{max}} \left[ \frac{a}{r} \right]^n \sum_{m=0}^n \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda \right] \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (4)$$

Onde  $GM$  é a constante gravitacional geocêntrica,  $r$  é o raio geocêntrico,  $\lambda$  é a longitude geodésica,  $\theta$  é a distância polar e  $a$  o raio equatorial elipsoidal.

$C_{nm}$  e  $S_{nm}$  são os coeficientes em harmônicos esféricos plenamente normalizados correspondentes ao MGG utilizado, e  $P_{nm}$  são os termos associados aos polinômios de Legendre de grau  $n$  e ordem  $m$ .

O termo de grau zero ( $n = 0$ ) na equação 4 representa o potencial de uma esfera homogênea de massa  $M$  sobre um ponto a uma distância  $r$  do centro da mesma, os termos de grau superior representam o afastamento da Terra real em relação a esfera homogênea (Gemael, 2012).

Já no caso da altura geoidal ( $N$ ), ela é calculada a partir de  $\zeta$  segundo a seguinte equação (Hofmann & Moritz, 2005):

$$N = \zeta + dH \quad (5)$$

Sendo que o termo  $dH$  representa a separação entre o geoide e o quase-geoide, e seu cálculo é realizado como:

$$dH = \frac{\bar{g} - \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} H \approx \frac{\Delta g_B}{\bar{\gamma}} H \quad (6)$$

Onde  $\bar{\gamma}$  é a gravidade normal média ao longo da linha de prumo normal entre o elipsoide e o teluroide,  $\bar{g}$  a gravidade média ao longo da linha de prumo entre o geoide e a superfície terrestre, e  $H$  a altitude ortométrica. O cálculo de  $\bar{g} - \bar{\gamma}$  pode ser aproximado pela anomalia da gravidade de Bouguer ( $\Delta g_B$ ).

O efeito dos curtos comprimentos de onda sobre o geopotencial foi calculado usando a técnica RTM na forma do efeito resultante na anomalia de altitude ( $\zeta_{RTM}$ ) (Hirt, et al., 2010). O efeito é estimado por integração numérica de prismas, considerando um valor constante para a densidade das massas topográficas ( $2,67 \text{ gr/cm}^3$ ).

Para o cálculo da topografia residual são considerados dois modelos globais de topografia. Os longos comprimentos de onda do MDE de alta resolução ( $GMRT$ ), já considerados nos MGGs com desenvolvimento em harmônicos esféricos de ordem 280-2190 e/o 280 (longos e médios comprimentos de onda) são removidos aplicando um filtro passa – alta mediante um MDE de menor resolução ( $ETOP01$ ). Exclusivamente o efeito da topografia local sobre o geopotencial é levada em consideração para a modelagem da topografia residual, já que o efeito da topografia global é considerado nos longos comprimentos de onda dos MGGs (Tscherning, 2001).

Para realizar a integração numérica dos prismas e calcular o efeito RTM foi usado o *software TC-GRAVSOFT* (Forsberg & Tscherning, 2008), configurando um raio de integração de 220 km. O raio de integração usado no cálculo do efeito RTM foi estabelecido após a realização de alguns testes na região de estudo, nos resultados obtidos registrou-se que o efeito da topografia residual oriundo das massas topográficas situadas além desse raio resulta desprezível.

## b. Cálculo das discrepâncias

A discrepância do DVL em relação a uma Superfície de Nível Global (SNG) em cada ponto é calculada por:

$$\delta\zeta = N_{GNS/NIV} - \zeta \quad (7)$$

A estimativa do afastamento entre as superfícies de referência local e global pode ser encontrada como:

$$\bar{\delta}\zeta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta\zeta_i \quad (8)$$



Onde  $n$  é o número de referências de nível para as quais foi calculado o valor de  $\delta\zeta$  (Equação. 7). Paralelamente ao cálculo das anomalias de altitude, foram calculadas alturas geoidais ( $N$ ) seguindo as mesmas soluções apresentadas anteriormente, desta forma foi encontrada uma discrepância  $\delta N$  para cada ponto e o afastamento estimado entre as superfícies de referência local e global considerando para este caso como superfície de referência global o geoide.

Já no caso do método oceanográfico, para estimar o afastamento entre o DVL e um SVRG, é calculada a TNMM no ponto correspondente ao marégrafo (*La Libertad*). A TNMM é calculada segundo a equação 9, usando o modelo de MSS *CNESCLS011* associado com o MGG *GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM\_R5*.

$$TNMM = MSS_{CLS011} - \zeta_{TIM\_R5} \quad (9)$$

Para o cálculo da TNMM pode ser usado tanto a anomalia de altitude como a altura geoidal, já que no oceano as duas grandezas tendem a ser iguais.

A TNMM calculada contém o erro gerado pela diferença de épocas de referência da MSS obtida do *CLS011* e da anomalia de altitude oriunda do MGG.

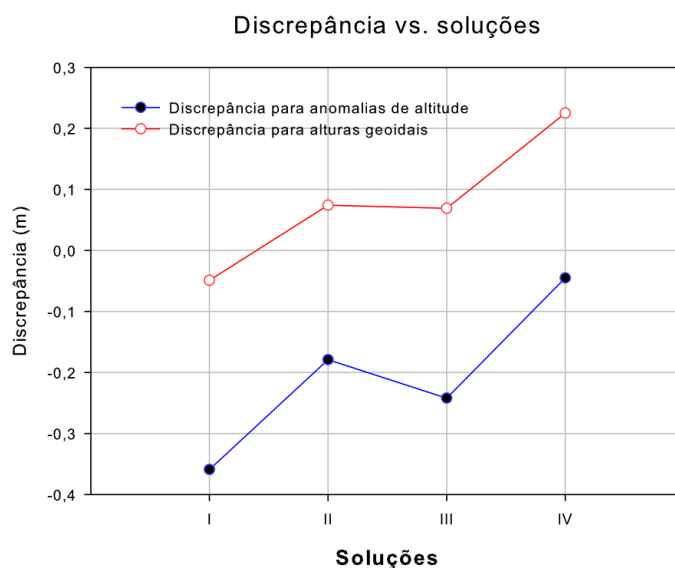
A discrepância obtida da equação 8 pode ser comparada com a TNMM (Equação 9), a fim de estabelecer o grau de consistência entre os dois métodos usados (geodésico e oceanográfico) (Equação 10).

$$\delta = \bar{\delta}\zeta - TNMM \quad (10)$$

### 3. Resultados e discussões

#### 3.1 Discrepâncias para anomalias de altitude e alturas geoidais

Dos resultados obtidos da equação 8 considerando as quatro soluções (Tabela 1), pode-se apreciar que em todos os casos com exceção da solução I, as discrepâncias calculadas  $\bar{\delta}N$  e  $\bar{\delta}\zeta$  têm uma tendência positiva quando a superfície de referência global é o geoide. Já para os cálculos realizados considerando as anomalias de altitude, as tendências para as soluções são em todos os casos negativas (Figura 2).



**Figura 1:** Discrepâncias Vs. Soluções

As diferenças médias quadráticas (DMQs) das discrepâncias calculadas para as diferentes soluções situam-se no intervalo de [0,60 m; 1,02 m]; a menor DMQ foi conseguido com a solução II para as alturas geoidais (Tabela 1). As discrepâncias obtidas são menores para as soluções dadas pelo cálculo de alturas geoidais, com exceção da solução IV.

A complementação dos curtos comprimentos de onda na solução IV das anomalias de altitude, resulta um  $\bar{\delta}\zeta \sim 5$  cm e com uma DMQ de 0,70 m, sendo este o menor valor de discrepância registrado. Igual resultado ( $\sim 5$  cm) foi obtido com a solução dada para o caso das alturas geoidais (solução I) com o *GO\_CONS\_GCF\_2\_TIM\_R5*, porém com uma DMQ levemente maior (0,78 m).

Analisando separadamente as DMQs obtidas para  $N$  e para  $\zeta$ , as maiores DMQs são registradas para a solução III em ambos os casos. Em forma geral, as menores discrepâncias foram calculadas em relação a uma superfície de referência representada pelas alturas geoidais, no entanto a magnitude das DMQs calculadas não permite definir se o SVRE está mais próximo de um sistema de altitudes ortométricas ou de um sistema de altitudes normais.

**Tabela 1:** Discrepâncias calculadas para as quatro soluções propostas

Solução	Combinação de modelos	$\bar{\delta}N(m)$	DMQ(m)
I	NGNSS/NIV - N <sub>TIM_R5</sub>	-0,05	0,78
II	NGNSS/NIV - N <sub>EGM2008</sub>	0,07	0,60
III	NGNSS/NIV - N <sub>TIM_R5</sub> + RTM	0,07	0,82
IV	NGNSS/NIV - N <sub>TIM_R5</sub> + (EGM2008 280 -2190) +RTM	0,23	0,78
		$\bar{\delta}\zeta(m)$	DMQ(m)
I	NGNSS/NIV - $\zeta_{TIM_R5}$	-0,36	1,00
II	NGNSS/NIV - $\zeta_{EGM2008}$	-0,18	0,66
III	NGNSS/NIV - $\zeta_{TIM_R5}$ + RTM	-0,24	1,02
IV	NGNSS/NIV - $\zeta_{TIM_R5}$ + (EGM2008 280 -2190) + RTM	-0,05	0,70

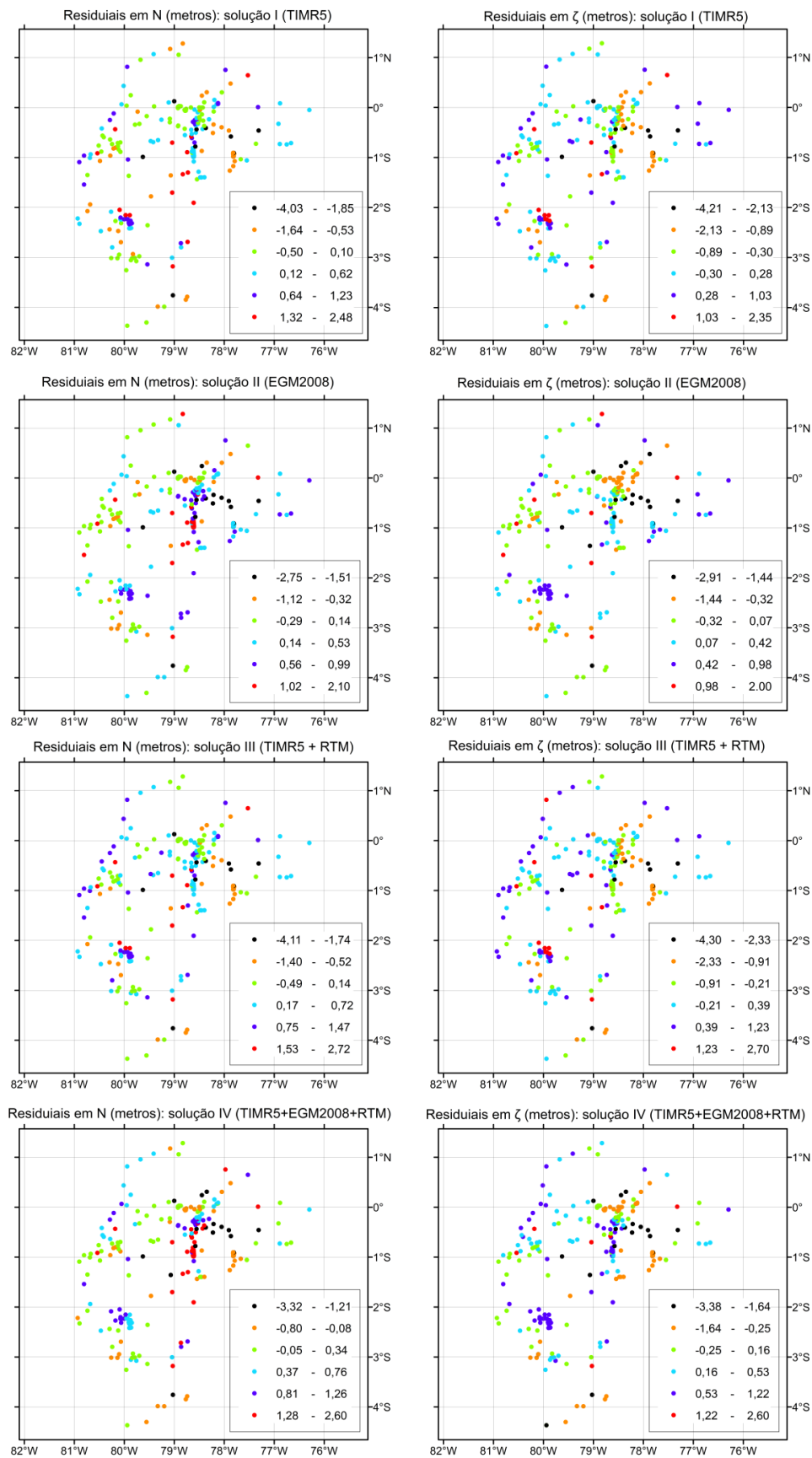
### 3.2 Residuais das discrepâncias

Com a finalidade de testar os residuais das discrepâncias  $\bar{\delta}N$  e  $\bar{\delta}\zeta$  (Equação 7) dos pontos teste para as quatro soluções propostas em relação a uma superfície ajustada (Equação 11), foi usado um modelo paramétrico (Equação 11) para o cálculo de quatro parâmetros, uma escala ( $x_0$ ) e um deslocamento espacial ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ) para cada um dos pontos (Kotsakis, 2012).

$$N_i^{GNSS/NIV} - \zeta_i^{MGG/RTM} = x_0 + \Delta_x \cos \varphi_i \cos \lambda_i + \Delta_y \cos \varphi_i \sin \lambda_i + \Delta_z \sin \varphi_i \quad (11)$$

Onde  $N_i^{GNSS/NIV}$  são as alturas geoidais calculadas em função das altitudes GNSS e as niveladas,  $\zeta_i^{MGG/RTM}$  são as anomalias de altitude e alturas geoidais obtidas para as quatro soluções propostas (MGG/RTM),  $\varphi_i$  e  $\lambda_i$  são as coordenadas geodésicas dos pontos de teste.

Os residuais obtidos do ajustamento usando o modelo paramétrico (Equação 11) para cada uma das soluções podem ser observados na Figura 3, para verificar a existência ou não de uma tendência espacial, a distribuição espacial dos pontos é apresentada usando uma escala de cores para representação dos residuais calculados.



**Figura 2:** Residuais para as referências de nível

A alta dispersão das discrepâncias faz com que a superfície ajustada gere residuais maiores de 4 m, porém, uma significativa quantidade de referências de nível têm residuais menores a 1 m (Figura 3). O elevado grau de variabilidade das discrepâncias determinadas para os pontos dados poderia dever-se à existência de efeitos locais não modelados pelos MGGs, parte do sinal do potencial gravitacional não considerado nos modelos poderia estar afetando à componente não sistemática envolvida no cálculo das discrepâncias.

### 3.3 Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM)

Com o objetivo de contrastar o resultado obtido para  $\bar{\delta}\zeta$  e  $\bar{\delta}N$  com outra forma de abordar o problema, a TNMM (Equação 9) foi determinada no DVE. O valor obtido do MSS originalmente referido ao denominado elipsoide *Topex/Poseidon* (Keyzers, et al., 2013) foi transformado ao WGS84 (*World Geodetic System* 1984) que corresponde, para efeitos práticos, ao GRS80 (*Geodetic Reference System* 1980) o qual é base do SIRGAS2000, convertido ao sistema de maré permanente *tide-free*, para ser compatível com a  $\zeta$  obtida dos MGGs.

A conversão foi realizada em função da latitude do ponto (marégrafo) usando a “fórmula derivada empírica” (Equação 12) (Renganathan, 2010).

$$\delta_h = h_2 - h_1 = -\left((a_2 - a_1) * \cos(\varphi)^2 + (b_2 - b_1) * \sin(\varphi)^2\right) \quad (12)$$

Com a Equação 12 é calculada a diferença ( $\delta_h$ ) entre a altitude referida ao elipsoide 2 e a altitude referida ao elipsoide 1. Os parâmetros  $a_2$  e  $a_1$  são respectivamente o semieixo maior do elipsoide 2 e do elipsoide 1;  $b_2$  e  $b_1$  são respectivamente o semieixo menor do elipsoide 2 e do elipsoide 1. Os resultados do cálculo da TNMM em função da MSS e  $\zeta$  calculados para o marégrafo, constam na Tabela 2.

**Tabela 2:** Cálculo da TNMM no marégrafo

Estação	Latitude	Longitude	MSS (m)	$\zeta$ (m)	TNMM(m)
<i>La Libertad</i>	2° 13' 8,8911" S	80° 54' 18,5366" W	11,61	11,54	0,07

A comparação (Equação 10) entre a TNMM e o  $\bar{\delta}\zeta$ , mostra que a TNMM tem em geral uma maior aderência com as discrepâncias calculadas para as alturas geoidais ( $\bar{\delta}N$ ), com exceção da solução IV em cujo caso o valor de  $\delta$  é menor para a solução dada pelo cálculo de anomalias de altitude ( $\bar{\delta}\zeta$ ) (Tabela 3).

As DMQs calculadas não possibilitam concluir que o SVRE se adapta de melhor forma a um sistema de altitudes ortométricas, embora o valor de TNMM calculado (método oceanográfico) e os  $\bar{\delta}N$  da abordagem geodésica sejam próximos.

**Tabela 3:** TNMM Vs. Discrepâncias

Solução	$\delta = \bar{\delta}N - TNMM$ (metros)	$\delta = \bar{\delta}\zeta - TNMM$ (metros)
I	-0,12	-0,43
II	0,00	-0,25
III	0,00	-0,32
IV	0,15	-0,12

O modelo de TNMM recentemente disponibilizado *MDT\_CNES-CLS13*, contém valores estimados da TNMM para o período 1993-2012 em função da MSS referida ao elipsoide *Topex/Poseidon* e de alturas geoidais provenientes do modelo de geopotencial *EGM-DIR-R4*. O valor de TNMM para o marégrafo *La Libertad* segundo o *MDT\_CNES-CLS13* é 0.5641 m, porém não pode ser comparado com os valores de TNMM obtidos da Equação 9, por estar referidos a elipsoides diferentes e por ser calculados considerando diferentes MGGs.

#### 4. Considerações finais

A metodologia aplicada é uma tentativa de cálculo do afastamento do SVRE ao ser comparado com uma superfície de referência global. A aplicação de diferentes abordagens é útil para obter um indicador de qual a metodologia que melhor se ajusta ao caso de estudo equatorial. As DMQs calculadas para as diferentes soluções não apresentam uma diferença que permita definir com clareza qual a solução que gera a superfície de referência global melhor ajustada ao SVRE, no entanto as menores DMQs são registradas para as soluções II e IV.

Os afastamentos entre o SVRE calculados considerando como superfície de referência global o geóide apresentam uma tendência positiva para as soluções II, III e IV; já no caso das anomalias de altitude, todas as soluções geram valores negativos; as discrepâncias obtidas para a solução II e III das alturas geoidais (0,07 m) é igual ao valor calculado para a TNMM o qual demonstra consistência entre as duas abordagens utilizadas.

As discrepâncias obtidas para todas as soluções contêm uma componente sistemática de pequenas proporções associada com o afastamento entre o SVRE e os diferentes Sistemas Globais de Altitudes (SGAs) adotados para realizar a análise no presente estudo. A componente correspondente às altas frequências do potencial gravitacional relacionada com os efeitos locais, supera em magnitude o efeito sistemático vinculado ao offset do SVRL.

As DMQs contêm a variabilidade correspondente ao contraste dos efeitos locais provenientes das observações GNSS/NIV com as aproximações globais do potencial gravitacional terrestre, e adicionalmente a variabilidade associada com a discrepância do DVL, por causa da pequena magnitude desta última componente não é possível separá-la da componente total.

A heterogênea variabilidade encontrada nas DMQs, explicada pelo efeito das altas frequências do potencial gravitacional, não permite discriminar entre qual seria o sistema de altitudes (ortométrico ou normal) que melhor se ajusta ao SVRE.

A comparação dos dados GNSS/NIV com os MGGs melhorados com a técnica RTM, e o cálculo da TNMM usando um modelo de MSS e um MGG de referência, resultam na determinação de

grandezas de ordem centimétrica; a magnitude de ditas grandezas pode ser explicada por uma proximidade da superfície de referência local  $W_o^i$  com a superfície de referência global  $W_o$ . A TNMM calculada mostra ter em geral maior aderência com as discrepâncias calculadas para as alturas geoidais, as diferenças entre as duas abordagens chegam a ser nulas para o caso da solução II e III, em tanto que para as anomalias de altitude a menor discrepância se registra para a solução IV com 12 cm (Tabela 3).

É importante considerar alguns aspectos sobre as características dos dados e modelos usados para desenvolver a metodologia proposta, o valor de  $N_{GNSS/NIV}$  calculado das referências de nível (Equação 2) contém o erro implícito da comparação de duas grandezas determinadas desde distintas superfícies de referência (aproximação teórica). Os erros estimados para as altitudes elipsóidicas não estão disponíveis, porém são da ordem dos 10 cm (Comunicação pessoal - IGM).

As altitudes niveladas têm uma tolerância de fechamento de  $4\text{ mm}\sqrt{k}$  (IGM, 2005), o qual pode ser aproximado a um erro na determinação de altitudes de aproximadamente 6 cm. O ajustamento da RVRE ainda não foi realizado, portanto a distribuição dos erros de nivelamento não tem sido considerada na determinação das altitudes. Fazendo o cálculo da distribuição de erros gerados na determinação de altitudes niveladas e elipsóidicas, obtém-se um  $\sigma$  para o  $N_{GNSS/NIV}$  de aproximadamente  $\pm 12\text{ cm}$ .

Erros de omissão e comissão oriundos dos MGGs também têm que ser considerados, além do termo de grau zero. A técnica RTM melhora o desempenho dos MGG aportando informação da alta frequência do sinal gravimétrico, porém existe uma incerteza entre a porção do espectro que envolvem os MDEs quando são combinados com os MGGs.

Um conjunto de dados GNSS/NIV com uma melhor distribuição espacial e pertencentes a uma rede ajustada poderia otimizar o cálculo das discrepâncias do SVRE ao ser comparado com um SGA. Além disso, dados concernentes à rede gravimétrica local poderiam aportar informação importante para melhorar as soluções encontradas e conseguir otimizar o cálculo das discrepâncias.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à *Secretaria de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de Ecuador* (SENESCYT) pela bolsa concedida ao pós-graduando José Luis Carrión Sánchez e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPq) processo 301797/2008-0, pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa do pesquisador Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alavera, J., & Nath, J. “*Establecimiento del Datum Vertical para la Cartografía del Ecuador2010*” *ACTA OCEANOGRÁFICA DEL PACÍFICO VOL. 18 N° 1* (ACTA OCEANOGRÁFICA DEL PACÍFICO VOL. 18 N° 1), 2013.

Amante, C., & Eakins, B. *ETOPO1 - 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis*. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 2009, 19.

Bosch, W. “The Sea Surface Topography and its Impact to Global Height System Definition.” Edição: Drewes, H., Dodson, A., Fortes, L., Sánchez, L. & Sandoval, P. *Vertical Reference Systems, International Association of Geodesy Symposia*. Springer, 2001. 225-230.

- Brockmann, J., et al. "EGM\_TIM\_RL05: An independ geoid with centimeter accuracy purely based on the GOCE mission." *Geophysical Research Letters* 41 (2014): 8089-8099.
- Burša, M., Kenyon, S., Kouba, J., Šíma, Z., Vatrt, V., & Vojtíšková, M. "A *Global Vertical Reference Frame Based On Four Regional Vertical Datums*" *Studia Geophysica Et Geodaetica* 48 (2004): 493-502.
- Carrión, J., Tierra, A., & Del Cogliano, D. Generación de una malla de ondulaciones geoidales por el método GPS/nivelación y redes neuronales artificiales a partir de datos dispersos. Dissertação de mestrado, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, La Plata: UNLP, 2013.
- CNES. *CNES De l' Espace pour la Terre*. Edição: CNES. 2014. <http://www.cnes.fr/web/CNES-en/1461-topexposeidon.php> (acesso em 11 de 2014).
- Echeverría, A., & Tierra, A. Generación de un modelo de ondulaciones geoidales del Ecuador continental mediante Mínimos Cuadrados Colocación (LSC). Trabalho de Graduação, Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército, 2010.
- Ekman, M. "Impacts of Geodynamic Phenomena on Systems for Height and Gravity" Edição: Springer. *Journal of Geodesy* (Springer) 63 (1989): 281-296.
- Ekman, M. "Using Mean Sea Surface Topography for Determination of Height System Differences across the Baltic Sea." *Marine Geodesy*, 1999: 31-35.
- Ferreira, V., Zhang, Y., & De Freitas, S.R.C. "Validation of GOCE gravity field modes using GPS-levelling data and EGM08: A case Study in Brazil." *Journal of Geodetic Science* 3 (10 2013): 209-218.
- Ferreira, V.G., & De Freitas, S.R.C. "An Attempt to Link the Brazilian Height System to a World Height System." *Boletim de Ciências Geodésicas*, Setembro 2012: 363-377.
- Forsberg, R., & Tscherning, C. "Geodetic Gravity Field Modelling Programs." Manual do usuário, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Copenhagen, 2008.
- Gemael, C. *Introdução á Geodésia Física*. Curitiba, Paraná: UFPR, 2012.
- Gomez, M., Pereira, R., Del Cogliano, D., Ferreira, V.G., Luz, R.T., De Freitas, S.R.C., & Farias, C. "Analysis of the Discrepancies Between the Vertical Reference Frames of Argentina and Brazil." *International Association of Geodesy Symposia*, 2015.
- Hernández, J., Blitzkow, D., Luz, R., Sánchez, L., & Drewes, H. *Connection of the Vertical Control Networks of Venezuela, Brazil and Colombia*. Vol. 124, em *Vertical Reference Systems*, por International Association of Geodesy Simposia, 324-327. Cartagena: Springer, 2001.
- Hirt, C., Featherstone, W., & Marti, U. "Combining EGM2008 and SRTM/DTM2006.0 residual terrain model data to improve quasigeoid computations in mountainous areas devoid of gravity data." *Journal of Geodesy* (Springer) 84 (07 2010): 557-567.
- Hofmann, B., & Moritz, H. *Physical Geodesy*. Graz: Springer, 2005.
- ICGEM. *International Centre for Global Earth Models (ICGEM)*. 2014. <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/> (acesso em 01 de 11 de 2014).
- IGM. *Proyecto SIRGAS Ecuador*. Relatório técnico, Caracas: Reuniones Técnicas SIRGAS, 2005.



Jijón, M., & Tierra, A. *Determinación de ondulaciones geoidales residuales del Ecuador Continental*. Trabalho de graduação, Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército, 2008.

Keysers, J., Quadros, N., & Collier, P. "Vertical Datum Transformations across the Litoral Zone." Relatório técnico, CRC for Spatial Information, Australia, 2013.

Kotsakis, C. "A conventional approach for comparing vertical reference frames." *Journal of Geodetic Science*, 2012: 319-324.

Montecino, H., Cuevas, A., & De Freitas, S.R.C. "A Study of Chilean Vertical Network Through Global Geopotential Models and The CNES CLS 2011 Global Mean Sea Surface." *Boletim de Ciências Geodésicas* 20, nº 2 (2014): 300-316.

Montecino, H., & De Freitas, S.R.C. "Strategies for Connecting Imbituba and Santana Brazilian Datums Based on Satellite Gravimetry and Residual Terrain Model." Em *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet*. Australia: Springer, 2011.

Paredes, N. *Determinación del Datum Vertical de La Libertad, Ecuador*. Relatório técnico, Instituto Oceanográfico de la Armada, Ecuador: Instituto Oceanográfico de la Armada, 1986, 205-209.

Pavlis, N., Holmes, S., Keynon, S., & Factor, J. "An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008." Relatório técnico, Vienna, 2008.

Pazmiño, R. *Actividades desarrolladas por el IGM Ecuador, en torno al proyecto SIRGAS*. Relatório técnico, Panamá: Instituto Geográfico Militar, 2013.

Plag, H., et al. *The goals, achievements, and tools of modern geodesy, in Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020*. Edição: Ed. Pearlman, H.P. Springer Berlin, 2009.

Renganathan, V. *Arctic Sea Ice Freeboard Heights from Satellite Altimetry*. Tese de doutorado, Department of Geomatics Engineering, Calgary University, Calgary: Calgary University, 2010.

Ryan, W., et al. "The Global Multi-resolution Topography (GMRT) Synthesis." Relatório técnico, Lamont-Doherty Earth Observatory, Palisades, NY USA, 2009.

Schaeffer, P., Faugere, J., Legeais, A., Ollivier, T., & Guinle, N. "The CNES CLS11 Global Mean Sea Surface Computed from 16 Years of Satellite Altimeter Data." *Marine Geodesy* 35 (11 2012): 03-19.

Tierra, A., & De Freitas, S.R.C. *Metodologia para a geração da malha de anomalias gravimétricas para obtenção de geóide gravimétrico local a partir de dados esparsos*. Tese Doctoral, Departameno de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2003.

Tscherning, C. "Geoid determination after the first satellite gravity." Em *Festschrift Univ.prof. em. Dr.-Ing. Wolfgang Torge zum 70. Geburtstag*, 11-24. Hannover, 2001.

Submetido: Junho de 2015.

Aceito: Setembro de 2015.